



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 42 27 735 A 1**

⑤1 Int. Cl.<sup>5</sup>:  
**G 01 B 21/08**  
G 01 B 7/06  
G 01 N 27/72

⑳ Aktenzeichen: P 42 27 735.3  
㉔ Anmeldetag: 21. 8. 92  
㉔ Offenlegungstag: 24. 2. 94

DE 42 27 735 A 1

㉔1 Anmelder:  
Leybold AG, 63450 Hanau, DE

㉔4 Vertreter:  
Schickedanz, W., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 63073  
Offenbach

㉔2 Erfinder:  
Thorn, Gernot, Dipl.-Ing., 6450 Hanau, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

㉔54 Anordnung zur berührungslosen Messung der Dicke von Schichten

㉔57 Die Erfindung betrifft eine Anordnung zum berührungslosen Messen der Dicke von Schichten. Hierbei hat die zu messende Schicht einen vorgegebenen Abstand von einem Sensor, der ein Feld erzeugt, das in der zu messenden Schicht einen physikalischen Effekt bewirkt. Der Sensor kann seitlich nacheinander verschiedene Felder erzeugen. Durch Auswertung der bei verschiedenen Feldern auftretenden unterschiedlichen physikalischen Effekte wird die Schichtdicke bestimmt.

DE 42 27 735 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 12. 93 308 068/343

11/47

Die Erfindung betrifft eine Anordnung nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Beschichtete Bänder, Folien oder Scheiben werden auf zahlreichen Gebieten benötigt. So werden beispielsweise Kunststoffolien mit einer besonderen Schicht versehen, um diese Folien gegen Geruchsdiffusion zu sperren. Auch Fensterscheiben werden mit einer dünnen Metallschicht versehen, um gegen eine unerwünschte Infrarotstrahlung zu sperren. Das Aufbringen von dünnen Schichten erfolgt dabei in der Praxis mittels verschiedener Verfahren, z. B. mittels galvanischer Prozesse oder mittels Aufdampfen im Vakuum. Wichtig ist in allen Fällen, daß die jeweils notwendige Schichtdicke eingehalten wird. Dies wiederum erfordert eine entsprechende Messung der Dicke der Schicht.

Es ist bereits eine Anordnung zur berührungslosen Messung der Dicke elektrisch leitfähiger Schichten bekannt, die eine Induktionsspule mit einem Wechselspannungsgenerator sowie eine Meßeinrichtung für die Erfassung des Impedanzwertes der Induktionsspule aufweist (DE-A-23 45 849). Bei dieser Anordnung ist eine zweite Induktionsspule vorgesehen, die mit der ersten einen Luftspalt bildet. Durch diesen Luftspalt wird ein Band mit einer zu messenden Schicht geführt. Beide Spulen, die gewissermaßen eine Gabel bilden, werden von einem gleichsinnigen Strom durchflossen, und die Ausgangssignale beider Spulen werden additiv einer Meßeinrichtung aufgeschaltet. Nachteilig ist bei dieser Anordnung, daß eine Nullung oder Nullmessung wegen der Ortsfestigkeit der Sensoren bezüglich des Meßobjekts nicht möglich ist.

Außer der gabelförmigen Meßanordnung gibt es auch noch Meßanordnungen mit einer Umlenkwalze, über die ein Band geführt ist (DE-A-33 35 766). Hierbei weist die Umlenkwalze mehrere Sensoren auf, die in der Umlenkwalze an deren Oberfläche und auf die Länge der Umlenkwalze verteilt angeordnet und durch eine Übertragungseinrichtung mit einer Auswerteschaltung verbunden sind. Die Schichtdicke kann dabei kapazitiv (US-A-4 968 947), induktiv (DE-A-38 15 009) oder kapazitiv/induktiv (US-A-4 958 131) erfolgen. Die Null-Messung, d. h. die Messung, wenn keine Schicht vorliegt, und die Objekt-Messung, d. h. die Messung bei vorliegender Schicht, werden hierbei zeitmultiplex durchgeführt. Da der Sensor in die sich drehende Umlenkwalze eingebaut ist, über die Endlosband geführt ist, gelangt der Sensor einmal in die Nähe des Bands und einmal in einen Abstand von dem Band. Durch Auswertung des Null-Signals und des Meßsignals kann auf die Dicke der jeweiligen Schicht geschlossen werden.

Nachteilig ist bei der Meßwalzen-Methode, bei der die Messung entsprechend dem Umfang der Meßwalze in bestimmten zeitlichen Abständen erfolgt, daß bei hohen Bandgeschwindigkeiten und damit hohen Umdrehungszahlen der Walze Unwuchtprobleme an der Walze auftreten.

Der Erfindung liegt deshalb die Aufgabe zugrunde, eine Anordnung zum berührungslosen Messen der Dicke von Schichten zu schaffen, mit welcher eine einwandfreie Nullmessung und Kalibrierung möglich ist.

Diese Aufgabe wird gemäß den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst.

Der mit der Erfindung erzielte Vorteil besteht insbesondere darin, daß eine genaue Messung der Schichtdicke auch bei Bändern durchgeführt werden kann, die mit hoher Geschwindigkeit an der Meßanordnung vorbeilaufen.

laufen.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird im folgenden näher beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 eine Prinzip-Darstellung eines Schichtdicken-Meßsystems mit ortsfesten Sensoren;

Fig. 2 einen Schnitt durch zwei einander gegenüberliegende Sensoren und durch eine Folie, die eine Beschichtung trägt;

Fig. 3 eine induktive Schaltungsanordnung zum Messen und Kalibrieren einer Schichtdicke;

Fig. 4 Meßkurven, welche die Abhängigkeit der Meßgenauigkeit von der Lage einer Folie zwischen zwei Sensoren zeigen;

Fig. 5a zwei in einem Abstand zueinander angeordnete Elektromagnete, deren ungleichnamige Pole einander gegenüberliegen;

Fig. 5b ein elektrisches Ersatzschaltbild der Anordnung nach Fig. 5a, ergänzt durch einen Schwingkreis-Kondensator 68;

Fig. 6a zwei in einem Abstand voneinander angeordnete Elektromagnete, deren gleichnamige Pole einander gegenüberliegen;

Fig. 6b ein elektrisches Ersatzschaltbild der Anordnung nach Fig. 6a, mit Schwingkreis-Kondensator 76;

Fig. 7 eine Tabelle, in der verschiedene Ausgangsspannungen bei unterschiedlichen Polaritätsanordnungen angegeben sind;

Fig. 8 ein Blockschaltbild, das die Verarbeitung der Signale von mehreren Sensoren zeigt.

In der Fig. 1 ist ein Ausschnitt 19 aus einer Anlage dargestellt, in der die Dicken von Schichten gemessen werden, die auf einer Folie 1 oder dergleichen aufgebracht sind. Die Folie 1 wird an insgesamt vier Sensoren 2 bis 5 mit einer Geschwindigkeit  $v$  vorbeibewegt, was durch einen Pfeil 6 angedeutet ist. Jeweils zwei der vier Sensoren, z. B. 2 und 3 bzw. 4 und 5, liegen einander gegenüber, so daß die Folie 1 durch den Spalt bewegt wird, den diese Sensoren bilden. Die Sensoren 2 bis 5 sind an Schienen 7, 8 angeordnet, die gleichzeitig als Kabelkanäle dienen, in denen die elektrischen Zuleitungen 9, 10, 11, 12 zu den Sensoren geführt sind.

Bei den Sensoren 2 bis 5 handelt es sich um induktive Sensoren, die ein Wechselfeld erzeugen, das in der elektrisch leitenden und zu messenden Schicht Wirbelströme erzeugt, die wiederum auf das Wechselfeld rückwirken.

Die Fig. 2 zeigt einen Schnitt durch die beiden Sensoren 4, 5, die Folie 1 und die Schienen 7, 8. Man erkennt hierbei, daß die Sensoren jeweils eine Magnetspule 13, 14 enthalten, die mit einer E-förmigen Ferritschalenhälften 15, 16 eine Elektromagneten bildet, der ein Wechselfeld abgibt. Die Ferritschalenhälften 15, 16 haben vom U-förmigen Sensorgehäuse 4, 5 einen vorgegebenen Abstand und sind mittels einer Schraube 17, 18 mit diesem und mit der Schiene 7, 8 verbunden.

In der Fig. 3 ist die Schaltungsanordnung näher dargestellt, mit der das durch die Spulen 13, 14 fließende Signal ausgewertet wird. Eine derartige Schaltungsanordnung ist bereits bekannt und z. B. in der DE-A-38 15 009 beschrieben. Die Spulen 13, 14 sind hierbei ein Teil eines Parallelschwingkreises 20, der einen Kondensator 21 aufweist. Parallel zur Spule 13 ist ein Kupferwiderstand 33 dargestellt. Die Spulen 13, 14 sind in Reihe geschaltet und werden somit von demselben Strom durchflossen. Wird eine Spule 13 der anderen Spule 14 gegengeschaltet, so tritt ein Kompensationsfall ein, wo in der Mitte zwischen den Spulen eine Auslö-

schung für die axiale Magnetfeld-Komponente erfolgt. Es gelangen dann keine Feldlinien mehr von der einen zur anderen Magnetspule, d. h. die Kopplung ist Null. Auch ein an dieser Stelle befindliches Meßobjekt ist nicht mehr angekoppelt. Die zu messende dünne Schicht, die sich auf der Folie 1 befindet, ist durch ein Ersatzschaltbild dargestellt, das eine Spule 22 aufweist, die parallel zu einem ohmschen Widerstand 23 geschaltet ist. Der aus den Spulen 13, 14 und dem Kondensator 21 bestehende Parallelschwingkreis ist mit einem Oszillator 24 verbunden, der auf einer Frequenz von z. B. 1,8 MHz schwingt und der am Schwingkreis 20 eine konstante Spannung  $U_{\text{Sensor}}$  erzeugt. Die Einkopplung der Oszillatorspannung  $U_{\text{Osz}}$  in den Parallelschwingkreis 13, 14, 21 erfolgt über einen Widerstand 25, der als Meßwiderstand für den Strom  $I_1$  dient. Die über diesem Widerstand 25 abfallende Spannung  $U_1$  wird auf einen Verstärker 26 gegeben. Eine zwischen der Spannung  $U_{\text{Osz}}$  des Oszillators 24 und der Spannung des Parallelschwingkreises 13, 14, 21 auftretende Phasenverschiebung wird über ein Phasenkorrekturglied 27 auf den Oszillator 24 rückgekoppelt. Dieses Phasenkorrekturglied 27 bringt die Phasenabweichung durch Nachregelung der Frequenz auf Null. Die Bezugsspannung, für die ( $\varphi = 0$  gilt, tritt am Punkt 28 auf. Das Phasenkorrekturglied 27 regelt somit den Phasenunterschied zwischen  $U_{\text{Osz}}$  und  $U_{\text{Sensor}}$  auf Null zurück, d. h. der  $\cos \varphi$  der Last 13, 14, 21 ist stets 1. Ohne die Korrektur durch das Phasenkorrekturglied 27 würde am Punkt 35, also zwischen dem Schwingkreis 13, 14, 21 und dem Widerstand 25, eine Phasenverschiebung auftreten. Durch die Korrektur auf  $\varphi = 0$  wird die Last des Schwingkreises 13, 14, 21 rein ohmsch, so daß die Induktivität der Spulen 13, 14 bzw. die Kapazität des Kondensators 21 außer Betracht bleiben können. Befindet sich der Parallelschwingkreis in Resonanz, so sind alle Blindkomponenten kompensiert, und die Hochfrequenzspannung des Schwingkreises hat denselben Phasenwinkel wie die Spannung  $U_{\text{Osz}}$ .

Hierdurch verbleibt im Parallelschwingkreis 13, 14, 21 neben dem Kupferwiderstand 83 der Spulen 13, 14 ein rein ohmscher Widerstand 29, der ein Maß für die Dicke der zu messenden Schicht ist, denn der rein ohmsche Widerstand 23 der Schicht wird über die Spulen 22, 13, 14 die als Transformator dienen, in den Schwingkreis 13, 21 herübertransformiert. Parallel zu den Spulen 13, 14 kann noch ein Kalibrierungswiderstand 30 mittels eines Schalters 31 geschaltet werden, der seinerseits von einer externen Steuereinrichtung 32 gesteuert wird. Beim Empfang eines Kalibrierungssignals von der Steuereinrichtung 32 schließt der Schalter 31 und fügt den Widerstand 30 in den Schwingkreis ein, der eine Normal-Last darstellt, d. h. er stellt einen Sollwert-Widerstand dar, der seinerseits ein Maß für die Sollwert-Dicke der zu messenden Schicht ist. Die Steuereinrichtung wirkt auch auf den Operationsverstärker 26 und stellt dessen Verstärkungsgrad z. B. stufenweise ein.

Die Spulen 13, 14 entsprechen z. B. den Spulen 13, 14 in Fig. 2. Die Spulen 13, 14 sind in Reihe geschaltet und werden im Normalbetrieb mit der Hochfrequenzspannung des Oszillators 24 beaufschlagt. Von Zeit zu Zeit findet jedoch eine Umpolung der Hochfrequenzspannung an wenigstens einer der Spulen 13, 14 statt, was mittels eines Umschalters geschieht. Die durch das Umschalten bewirkten Änderungen durch Wirbelströme werden durch Abgreifen der Spannung am Widerstand 25 ermittelt.

In der Fig. 4 ist dargestellt, wie die Dickenmessung in

einer Anordnung gemäß der Fig. 1 und 2 durch "Flattern" der Folie zwischen den Sensoren verfälscht werden kann. Mit Pos 4 ist die räumliche Position des Sensors 4 bezeichnet, während mit Pos 5 die räumliche Position des Sensors 5 bezeichnet ist. Der Abstand  $a$  zwischen den beiden Sensoren 4, 5 beträgt im dargestellten Beispiel 20 mm. Die ideale Mittenposition der Folie ist mit 40 angegeben.

Die in der Fig. 4 dargestellten drei Kurven I, II, III stellen die gemessenen Dicken von drei verschiedenen Schichten in Abhängigkeit von der Auslenkung einer mit einer Schicht versehenen Folie aus der idealen Mittenlage dar. Die Kurve I zeigt die Meßwerte bei einer Schichtdicke von 50 nm, während die Kurven II und III die Meßwerte für Schichtdicken von 32 bzw. 18 nm darstellen. Wird die Folie 1 beispielsweise um 4 mm aus der Mittenlage zum Sensor 5 ausgelenkt, so werden die Werte bei 41, 42, 43 gemessen. Man erkennt hieraus, daß erhebliche Meßfehler erst bei Auslenkungen auftreten, die über 4 mm hinausgehen, d. h. das Meßsystem weist eine hohe Lageunempfindlichkeit auf.

Das in den Fig. 1 und 2 dargestellte und auch schon aus der DE-A-23 45 849 bekannte Meßprinzip, das für hohe Bandgeschwindigkeiten, z. B. 20 m/s, geeignet ist, führt somit zu sehr genauen Werten. Der Nachteil besteht, wie bereits erwähnt, lediglich darin, daß das Nullen und Kalibrieren mit Schwierigkeiten verbunden ist.

In der Fig. 5a sind die in der Fig. 2 dargestellten Ferritkernhälften 15, 16 noch einmal gezeigt, wobei die Spulen der Einfachheit halber weggelassen sind. Man erkennt hierbei die drei Schenkel 50, 51, 52 des Ferritkerns 15 sowie die drei Schenkel 53, 54, 55 des Ferritkerns 16. Die beiden äußeren Schenkel 50, 52 bzw. 53, 55 sind dann, wenn die Ferritkernhälften nicht länglich, sondern topfförmig ausgebildet sind, Bestandteile desselben Rings.

Die dargestellten Feldlinien 56 zeigen den Verlauf für den Fall, daß die obere Ferritkernhälfte 15 einen inneren magnetischen Südpol und einen äußeren magnetischen Nordpol hat, während die untere Ferritkernhälfte einen inneren Nordpol und einen äußeren Südpol aufweist.

Das Ersatzschaltbild eines Ferrit-Schalenkern-Paares mit Spulen ist in der Fig. 5b dargestellt, worin mit 60 und 65 zwei Streu-Induktivitäten bezeichnet sind, die keine Kopplung zu der zu messenden Schicht oder zueinander besitzen. Zwei Induktivitäten, die zu 100% miteinander und mit der zu messenden Schicht gekoppelt sind, sind mit 61 und 64 bezeichnet. Mit 62 und 63 sind die ohmschen Zusatzverluste durch die zu messende Schicht bezeichnet, die anteilig auf die beiden Teile der Magnetspulen 15, 16 entfallen. Es handelt sich hierbei um die ohmschen Zusatzwiderstände, die durch die Wirbelströme im Meßobjekt entstehen. Die Kupferverluste der jeweiligen Spulenhälften sind durch die Bezugswerte 66 und 67 symbolisiert. Mit 21 ist die Schwingkreis Kapazität bezeichnet. Wenn die Anschlüsse der Spule eines Sensors vertauscht werden, so hat dies für die Streu-Induktivitäten 60, 65 keine Auswirkungen. Die vollkommene Kopplung der Induktivitäten 61 und 64, die vom selben Strom durchflossen sind, bewirkt jedoch, daß sich deren Felder gegenseitig am Ort des Meßobjekts kompensieren.

In der Fig. 6a sind die Feldlinien 70 zwischen den Elektromagneten 15, 16 gezeigt, die sich bei einer Polumkehr an einem Elektromagneten, z. B. 15, bilden. Im Gegensatz zu Fig. 5a, wo sich jeweils verschiedenartige Pole gegenüberliegen, liegen sich nun gleichnamige Pole gegenüber.

Im Ersatzschaltbild der Fig. 6b kommen die unterschiedlichen Verhältnisse bei der Anordnung gemäß Fig. 6a im Vergleich zur Anordnung gemäß Fig. 5a deutlich zum Ausdruck. Als Folge der Umschaltung ist die Ankopplung des Sensors an das Meßobjekt, d. h. die beschichtete Folie, aufgehoben. Dies bedeutet, daß die zu messende Schicht, obwohl sie sich zwischen den beiden Elektromagneten 15, 16 befindet, von diesen nicht wahrgenommen wird. Die Streu-Induktivitäten 71, 74 der Fig. 6b entsprechen den Streu-Induktivitäten 60, 65 der Fig. 5b, während die Induktivitäten 72, 73 gegengekoppelt sind und sich somit aufheben. Es verbleiben die Kupferwiderstände 77, 75, die den Widerständen 66 und 67 entsprechen. Die Kapazität 76 hat ebenfalls den Wert der Kapazität 21. Nachdem es bei der Polumschaltung des einen Sensors gleich ist, ob sich eine zu messende Schicht zwischen zwei Sensoren 15, 16 befindet oder nicht, ergeben sich insgesamt acht Spannungswerte, die für eine Messung und Auswertung herangezogen werden können.

Betrachtet man zunächst einen Zustand, bei dem noch keine Umschaltung stattgefunden hat und beide Spulen 13, 14 von dem Hochfrequenz-Strom durchflossen werden (= Fig. 5a), so kann man am Sensorfolgende Ausgangsspannungen abgreifen:

$U_N$  = Spannung, wenn sich kein Meßobjekt zwischen den beiden Wechselstrom-Magneten 15, 16 befindet,  
 $U_M$  = Spannung, wenn sich ein Meßobjekt zwischen den beiden Wechselstrom-Magneten 15, 16 befindet,  
 $U_K$  = Spannung, wenn sich ein geeichtes Meßobjekt zwischen den beiden Wechselstrom-Magneten 15, 16 befindet,  
 $U_S$  = Spannung, wenn ein Normal-Widerstand zur Kalibrier-Simulation parallel zu den Spulen 13 und 14 geschaltet wird.

Es wird also schon ohne Meßobjekt, d. h. die dünne Schicht, eine Messung der "Null-Spannung"  $U_N$  durchgeführt. Der dabei ermittelte Wert ist als Null-Größe von jeder der danach folgenden Objektmessungen zu subtrahieren, denn jeder tatsächlich gemessenen Spannung ist die Null-Spannung linear überlagert. Es gilt somit

$$U_M - U_N = U_{MD}$$

In entsprechender Weise wird eine Kalibrierung mit einer Schichtprobe durchgeführt, deren Parameter bekannt sind

$$U_K - U_N = U_{KD}$$

Für  $U_K$  soll die Anzeige des Meßergebnisses auch zu späteren Zeitpunkten, etwa wenn eine Nachkalibrierung durchgeführt wird, immer wieder den Anfangswert ergeben, was z. B. mit Hilfe eines Einstell-Potentiometers als "Faktor"-Speicher möglich ist. Im rechnergesteuerten Betrieb wird ein entsprechender Faktor zur Korrektur der Kalibrierungs-Messung auf den Eichwert hin ermittelt und gilt dann bis zur nächsten Eichung.

Beim rechnergesteuerten Betrieb ist es auch möglich, durch einen Festwiderstand 30, der zu dem Sensor-Schwingkreis parallelgeschaltet ist (vgl. Fig. 3) einen Kalibrierungsvorgang zu simulieren. Der Vorteil der simulierten Kalibrierung besteht darin, daß die Simulation ferngeschaltet werden kann, was besonders während eines laufenden Meßvorgangs die Nachkalibrierung

ermöglicht. Für die simulierte Kalibrierung gilt:

$$U_S - U_N = U_{SD}$$

Gegenüber der vorangegangenen Gleichung ist also nur die Kalibrierungsspannung  $U_K$  durch die Simulationsspannung  $U_S$  ersetzt. Durch diesen Abgleich wird die Steilheit der gesamten Meßanordnung immer wieder auf den am Anfang der Messung festgelegten Wert eingestellt, d. h. die Meßempfindlichkeit wird auf diese Weise stabilisiert.

$U_{KD} \cdot FK = \text{const.} = U_{KA}$  (Kalibrier-Wert zu Beginn der Messung) bzw.

$U_{SD} \cdot FS = \text{const.} = U_{SB}$  (Wert der Simulation zu Beginn der Messung).

Hierbei sind FK bzw. FS die Korrektur-Faktoren, welche die Verstärkungsänderung der Gesamtmeßanordnung wieder auf den Anfangswert zurückführen. Aus den ermittelten Meßspannungen ergibt sich schließlich mit Hilfe der Steilheits-Faktoren

$S_L$ : Flächen-Leitwert/Spannung,  
 $S_R$ : Flächen-Widerstand  $\times$  Spannung, bzw.  
 $S_d$ : Schichtdicken-Wert/Spannung,  
 das Ergebnis des Meßvorgangs:  
 Flächen-Leitfähigkeit:  $G_{\square} = U_{MD} \cdot S_L$   
 Flächen-Widerstand  $R_{\square} = S \cdot 1/U_{MD}$  oder  
 Schicht-Dicke  $d = U_{MD} \cdot S_d$ .

Die hier gezeigte Weise, eine Schichteigenschaft zu messen, eignet sich für die Messung an Einzelobjekten, welche auf einer festen Bahn zwischen den beiden Spulen 13, 14 hindurch transportiert werden. Sehr günstig wirkt sich hierbei die Tatsache aus, daß zwischen den einzelnen Meßobjekten die Möglichkeit zur Nullung oder zur Kalibrierung besteht, wobei zur Kalibrierung auch die erwähnte automatische Simulation einer Schicht-Probe mittels eines Widerstands verwendet werden kann.

In der Fig. 7 ist eine Tabelle dargestellt, in der die verschiedenen Spannungen und ihre Bedeutung angegeben sind. In der oberen Hälfte 78 sind die verschiedenen Spannungen dargestellt, die sich bei gleichgepolten Spulen 14, 15 ergeben (Fig. 5a). Mit  $U_N$  ist die Ausgangsspannung des Sensors bezeichnet, wenn sich keine zu messende Schicht zwischen den Sensoren 15, 16 befindet und diese Sensoren so gepolt sind, wie es die Fig. 5a zeigt.  $U_M$  ist diejenige Spannung, die bei gleicher Polung der Spulen ansteht, wenn sich eine zu messende Schicht zwischen zwei Sensoren befindet. Wird bei gleicher Polung eine Spannung gemessen, wenn sich eine als Referenz dienende Beschichtung zwischen den Sensoren befindet, so wird diese Spannung  $U_K$ , d. h. Kalibrierungsspannung, genannt. Mit  $U_S$  ist schließlich eine Spannung bei der Polung gemäß Fig. 5a bezeichnet, die bei einer simulierten Kalibration auftritt. Bei einer simulierten Kalibration wird z. B. bei nicht vorhandener Beschichtung auf einer Folie der Widerstand 30 (Fig. 3) eingeschaltet. Dieser Widerstand ist so gewählt, daß er denselben Wert annimmt wie eine bestimmte Soll-Beschichtung.

Die Spannungen  $U_M$  und  $U_S$  können während des Bandlaufs gemessen werden, während die Spannungen  $U_N$ ,  $U_K$  zweckmäßigerweise vor der Bandbeschichtung gemessen werden. Die Spannung  $U_S$  kann selbstverständlich ebenfalls vor dem Bandlauf gemessen werden.

Wird die Spannung an der Spule des Sensors 15 umgepolt, wie es die Fig. 5a zeigt, so ergeben sich die in der unteren Hälfte 79 dargestellten Spannungswerte  $U_{NX}$ ,  $U_{MX}$ ,  $U_{KX}$  und  $U_{SX}$ .

Die Spannung  $U_D$ , die den elektrischen Leitwert einer zu messenden Schicht und damit deren Dicke angibt, errechnet sich über folgende Beziehung

$$U_D = U_M - U_{MX} - U_A \text{ wobei} \\ U_A = U_N - U_{NX}$$

vor dem Bandlauf gemessen wird.

Wenn man nun bildet:

$$U_D = U_M + U_{FP} - (U_{MX} + U_{FP}) - (U_N - U_{NX}),$$

wobei  $U_{FP}$  den momentanen Fehler während des Prozesses durch die Nulldrift bezeichnet, so gilt wegen der Feldkompensation am Meßort:

$$U_{MX} = U_{NX}$$

wie man es bei der erwähnten Messung von einzelnen Objekten auch erhält.

Nachdem  $U_A$  festliegt, wird die Spannung  $U_M$  gemessen, die sich bei einer Polung gemäß Fig. 5a ergibt, wenn eine zu messende Beschichtung zwischen den beiden Sensoren 15, 16 liegt. Anschließend wird bei vorhandener Beschichtung umgepolt, so daß sich die Polung gemäß Fig. 6a ergibt. Die hierbei gemessene Spannung  $U_{MX}$  wird von  $U_M$  abgezogen.

Bei den vorstehenden Ableitungen wird vorausgesetzt, daß die Nullpunktdrift bei beiden Polungen gemäß Fig. 5a und 6a gleich ist. Aus den Ersatzschaltbildern der Fig. 5b und 6b ersieht man, daß es ohne Belang ist, wenn bei einer Spule eines Sensorschwingkreises die Anschlüsse vertauscht werden. Die Kupferwiderstände bleiben in der Größe erhalten. Die vollkommene Gegenkopplung der mit der zu messenden Schicht magnetisch verbundenen Induktivität (Fig. 6a, 6b) bringt die Feldstärke an dieser Schicht auf Null, was bedeutet, daß die Schicht für die Sensoranordnung nicht mehr existiert. Die gemessene Spannung ist deshalb dieselbe, gleichgültig, ob sie vor oder während einer Bandbewegung vorgenommen wird.

Die Messung an der Schicht selbst erfolgt während der Bandbewegung, weil der aktuelle Wert dieser Schicht ermittelt werden soll. Alle Spannungen eines Sensors sind um denselben Wert der Drift, der sich den Meßspannungen linear überlagert, in gleicher Richtung verschoben. Aus der Zeit vor der Bandbewegung sind die beiden Spannungen  $U_N$  und  $U_{NX}$  bekannt, die in einem Speicher abgelegt wurden. Die durch die Differenz der beiden Spannungen charakterisierte Drift bleibt auch während der Bandbewegung erhalten.

Ähnlich wie bei der Nullung wird bei der Kalibrierung verfahren. Unter Kalibrierung wird hierbei der Vergleich von Meßdaten mit geeichter Primär- oder Sekundärnormalen verstanden, die unter definierten Bedingungen gewonnen wurde.

Die Basiskalibrierung wird in der Weise durchgeführt, daß eine Eichprobe zwischen die beiden Sensoren 15, 16 eingebracht und der Meßwert ermittelt wird. Von diesem Meßwert wird der Nullwert abgezogen, d. h. derjenige Wert, der sich bei nicht vorhandener Eichprobe ergibt. Da man jedoch während eines laufenden Meßvorgangs, wenn sich z. B. ein Band mit hoher Geschwindigkeit zwischen den beiden Sensoren 15, 16 bewegt,

keine Eichprobe an den Meßort bringen kann, wird die Kalibrierung simuliert, indem ein Meßwiderstand 30 in die Meßschaltung gemäß Fig. 3 eingebracht wird, dessen Wert bei der Basiskalibrierung ermittelt wurde.

Weil die Simulation immer durchführbar ist, kann die Steilheit oder Empfindlichkeit der Meßanordnung jederzeit bestimmt werden, und zwar auch dann, wenn sich eine zu messende Schicht zwischen den Sensoren 15, 16 befindet. In der Praxis wird die Empfindlichkeit in bestimmten Zeitabständen gemessen und im Auswertungsverfahren als aktueller Korrekturfaktor berücksichtigt. Die erwähnte Basiskalibrierung wird dagegen als Absolutwert-Kalibrierung für jedes Sensorpaar getrennt durchgeführt. Von diesem Wert unterscheidet sich die Simulationseichung nur durch einen Faktor, der auch in die Auswertung eingearbeitet wird.

In der Fig. 8 ist das Blockschaltbild einer erfindungs-gemäßen Anordnung in 8-kanaliger Ausführung dargestellt.

Neben den beiden bisher schon erwähnten Sensoren 15, 16 sind weitere sieben Sensorpaare vorgesehen, von denen nur das achte Paar durch die Bezugswerte 80 und 81 dargestellt ist. Alle Sensorpaare 15, 16 ... 80, 81 werden jeweils einer eigenen Auswerteelektronik 82 ... 83 zugeführt, die über eine Anpassungsschaltung 84 und eine Schnittstelle 85 mit einem Rechner 86 verbunden ist. An den Rechner sind ein Bildschirm 87, eine Regelungsschaltung 88 und ein Drucker 89 angeschlossen. Die Energieversorgung der Anordnung erfolgt aus dem Netz 90, an das ein Netzteil 91 angeschlossen ist.

Die bei der Erfindung durchgeführte "Nullung" ist gewissermaßen das zeitmultiplexe Gegenstück der Nullmethode in der allgemeinen Meßtechnik, bei welcher die Wirkung der zu messenden Größe durch eine andere bekannte Größe kompensiert wird. Während man dort einen Meß- und Vergleichszweig hat und die Differenz als Diagonalspannung einer Brückenschaltung direkt abgreifen kann, wird bei der Nullung an nur einem Sensor zuerst ein Signal als Nullsignal (= Signal für den Nulleffekt) abgegriffen und anschließend an demselben Sensor das Signal unter Wirkung eines Meßobjekts gemessen. Aus diesen Signalen — es kommen eventuell noch Kalibrierungs-Signale hinzu — werden durch Auswerteeinrichtungen die Meßergebnisse gewonnen. Die Besonderheit der Nullung besteht somit darin, daß nur ein Sensor-Element und nur eine Sensor-Elektronik benötigt wird.

#### Patentansprüche

1. Anordnung zum berührungslosen Messen der Dicke von Schichten, wobei die zu messende Schicht einen vorgegebenen Abstand von einem Sensor hat, der ein Feld erzeugt, das in der zu messenden Schicht einen physikalischen Effekt bewirkt, dadurch gekennzeichnet, daß der Sensor (2-5; 15, 16) zeitlich nacheinander verschiedene Felder erzeugen kann und der bei einem ersten Feld auftretende physikalische Effekt mit dem bei einem zweiten Feld auftretenden physikalischen Effekt zur Bestimmung der Schichtdicke ausgewertet wird.
2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Feld des Sensors (2-5; 15, 16) ein magnetisches Wechselfeld ist und daß die zu messende Schicht (2) elektrisch leitend ist.
3. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zwei einander gegenüberliegende

und ein Sensorpaar bildende Sensoren (15, 16) vorgesehen sind, zwischen denen sich die zu messende Schicht (2) befindet, und daß zu einem ersten Zeitpunkt die Felder der Sensoren (15, 16) gleichartig und zu einem zweiten Zeitpunkt ungleichartig sind, wobei die zu beiden Zeitpunkten in der Schicht (2) auftretenden physikalischen Effekte miteinander verglichen werden.

4. Anordnung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Sensorpaare (2, 3; 4, 5; 15, 16; 80, 81) in einer Reihe angeordnet sind.

5. Anordnung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das magnetische Wechselfeld durch einen Elektromagneten erzeugt wird.

6. Anordnung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Elektromagnet einen äußeren Pol (50, 52) und einen inneren Pol (51) aufweist und daß um den inneren Pol (51) eine mit einer Wechselspannungsquelle verbundene Spule (13, 14) gelegt ist.

7. Anordnung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Elektromagnet die Form eines Topfes (50, 52) mit einem coaxialen Steg (51) in der Mitte des Topfes (50, 52) hat.

8. Anordnung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß eine obere Schiene (7) und eine untere Schiene (8) vorgesehen sind, von denen jede mehrere Hälften eines Sensorpaares (2, 3; 4, 5) trägt, wobei diese Schiene (7, 8) als Kabelkanal dient.

9. Verfahren zum Messen der Dicke einer Schicht mit einer Anordnung, die wenigstens zwei einander gegenüberliegende Elektromagnete mit jeweils zwei Polen aufweist, wobei sich das zu messende Objekt zwischen den beiden Elektromagneten befindet, gekennzeichnet durch folgende Schritte:

a) es wird eine erste Spannung ( $U_M$ ) eines Elektromagneten (z. B. 15) gemessen, wenn sich ungleichnamige Polaritäten der beiden Elektromagneten (15, 16) gegenüberliegen und die zu messende Schicht sich zwischen den Elektromagneten (15, 16) befindet;

b) es wird eine zweite Spannung ( $U_{MX}$ ) des Elektromagneten (z. B. 15) gemessen, wenn sich gleichnamige Polaritäten der beiden Elektromagneten (15, 16) gegenüberliegen und sich die zu messende Schicht zwischen den Elektromagneten (15, 16) befindet;

c) die erste und die zweite Spannung werden in einer Auswerteschaltung (80–86) ausgewertet.

10. Verfahren nach Anspruch 10, gekennzeichnet durch folgende Schritte:

a) die erste Spannung ( $U_M$ ) und die zweite Spannung ( $U_{MX}$ ) werden voneinander abgezogen;

b) von der Differenz zwischen erster und zweiter Spannung ( $U_M - U_{MX}$ ) wird eine Korrekturspannung ( $U_\Delta$ ) abgezogen.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrekturspannung ( $U_\Delta$ ) die Differenz einer dritten Spannung ( $U_{NX}$ ) und einer vierten Spannung ( $U_N$ ) ist, wobei die dritte Spannung ( $U_N - U_{NX}$ ) bei gegengepolten Elektromagneten (15, 16) und nicht vorhandenem Meßobjekt und die vierte Spannung ( $U_N$ ) bei mitgepolten Elektromagneten (15, 16) und nicht vorhandenem Meßobjekt ermittelt wird.

12. Verfahren zum Messen der Dicke einer Schicht mit einer Anordnung, die wenigstens zwei einander gegenüberliegende Elektromagneten mit jeweils zwei Polen aufweist, wobei sich das zu messende Objekt zwischen den beiden Elektromagneten befindet, gekennzeichnet durch folgende Schritte:

a) es wird eine erste Spannung an den Spulen beider in Reihe geschalteter Elektromagneten gemessen, wenn die ungleichnamigen Polaritäten der beiden Elektromagnete einander gegenüberliegen und sich keine zu messende Schicht zwischen den Elektromagneten befindet;

b) es wird das Magnetfeld der Elektromagnete durch Umschalten gleichnamig gemacht und eine zweite Spannung an der Reihenschaltung der Spulen der beiden Elektromagnete gemessen;

c) es wird eine dritte Spannung an der Reihenschaltung der Spulen beider Elektromagnete gemessen, wenn sich ungleichnamige Polaritäten der beiden Elektromagneten gegenüberliegen und sich die zu messende Schicht zwischen den Elektromagneten befindet;

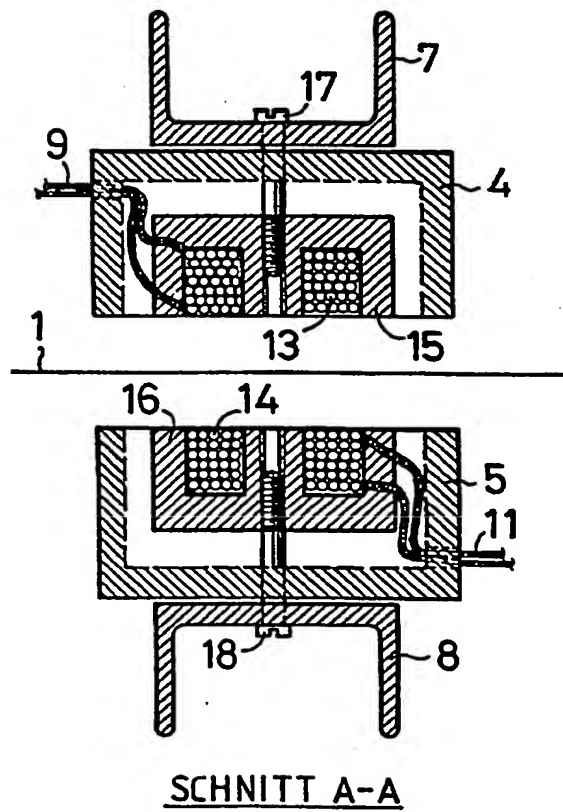
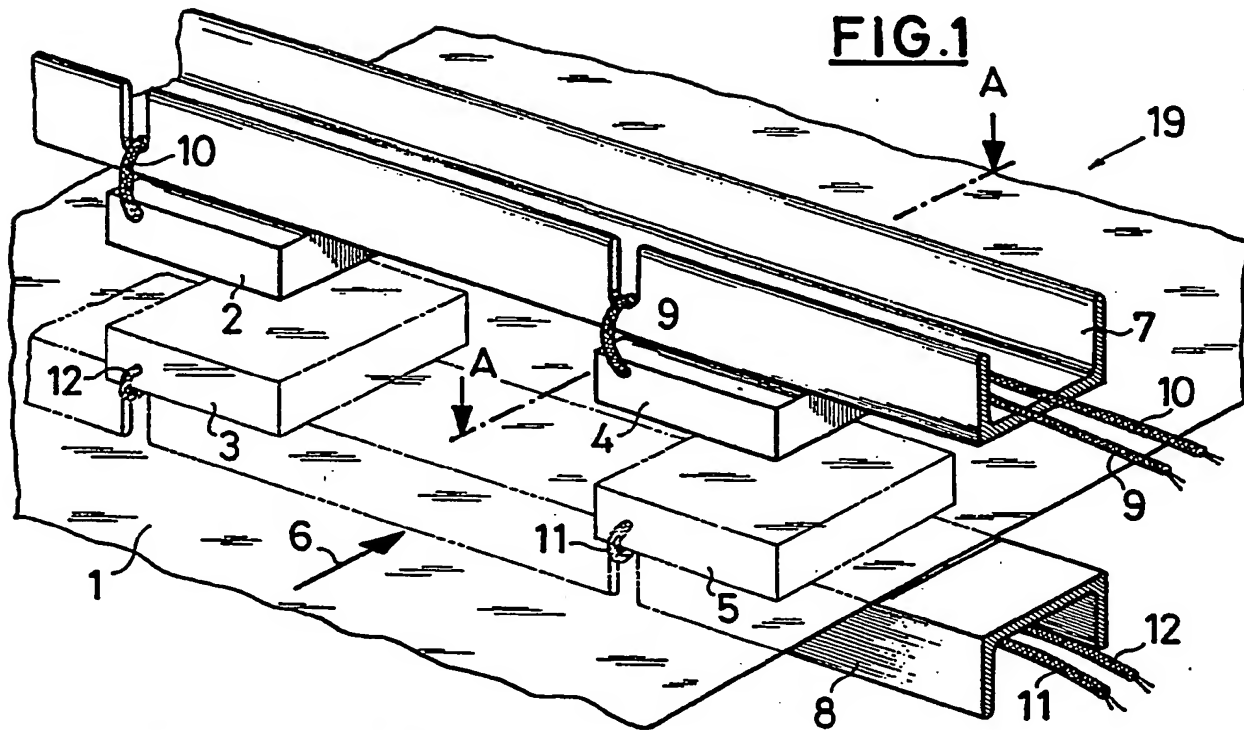
d) die Spannungen werden in einer Auswerteschaltung ausgewertet.

---

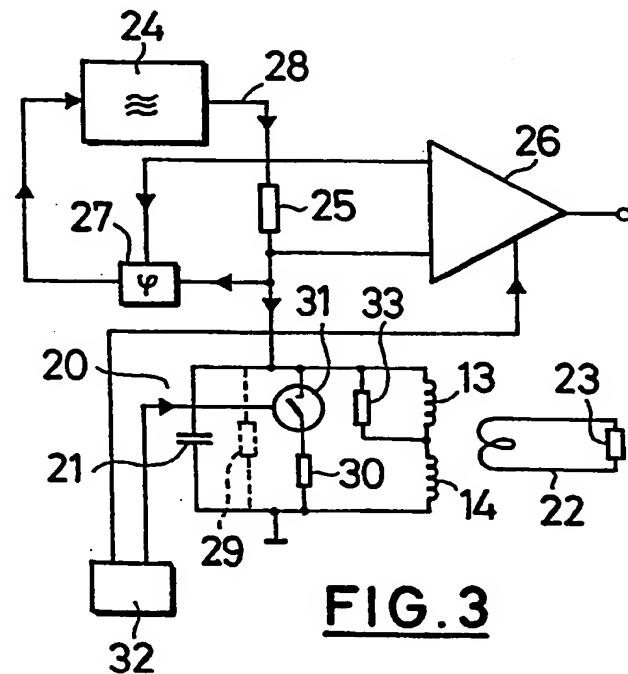
Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

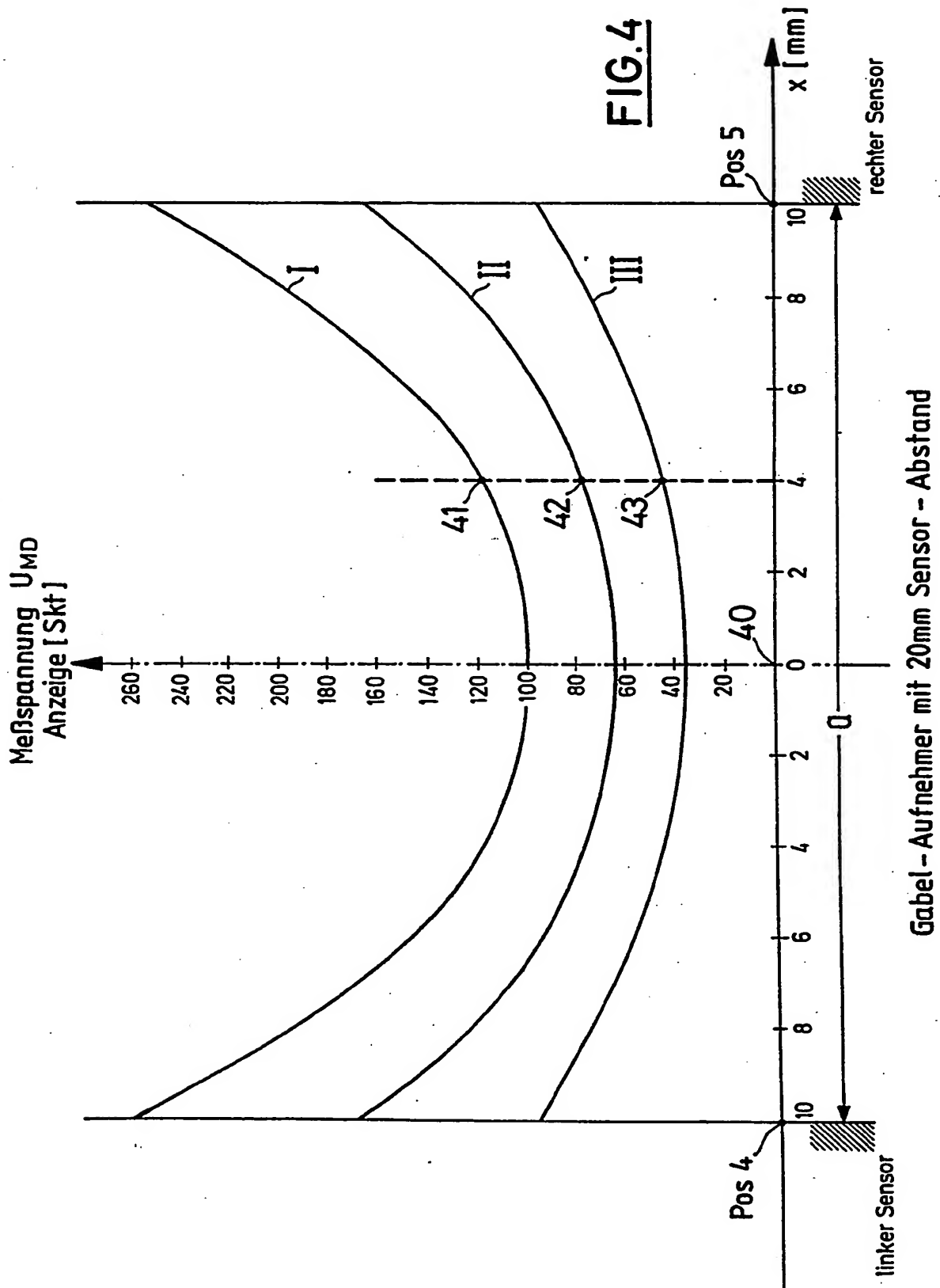
---

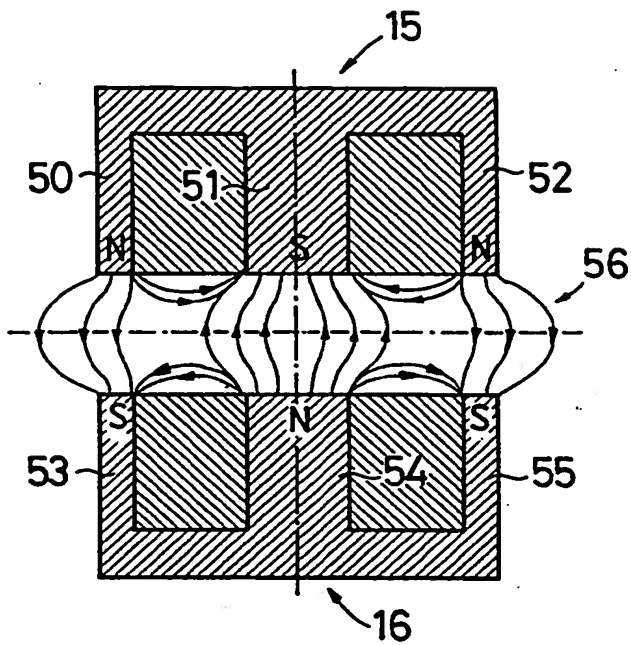
- Leerseite -



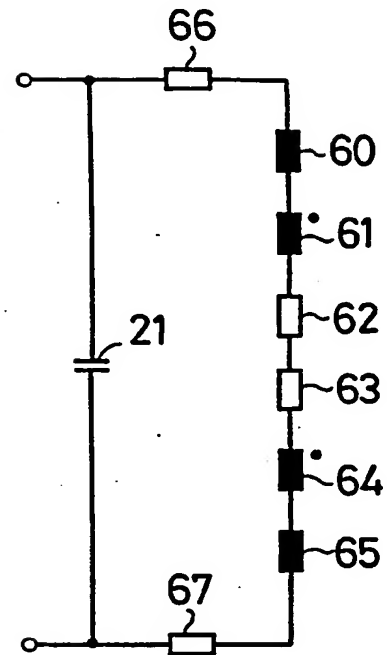
**FIG. 2**



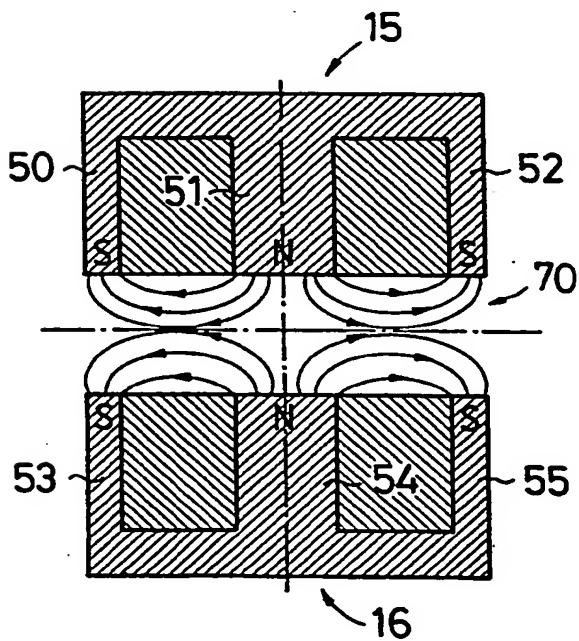




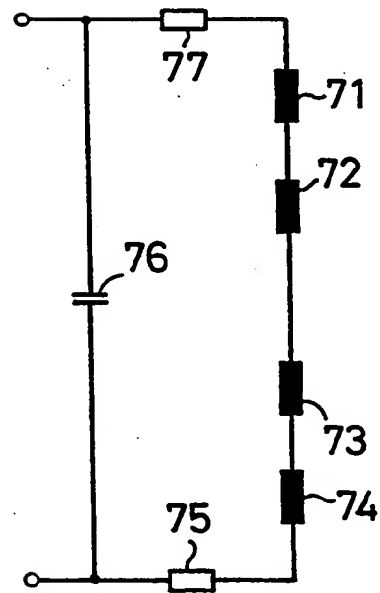
**FIG. 5a**



**FIG. 5b**



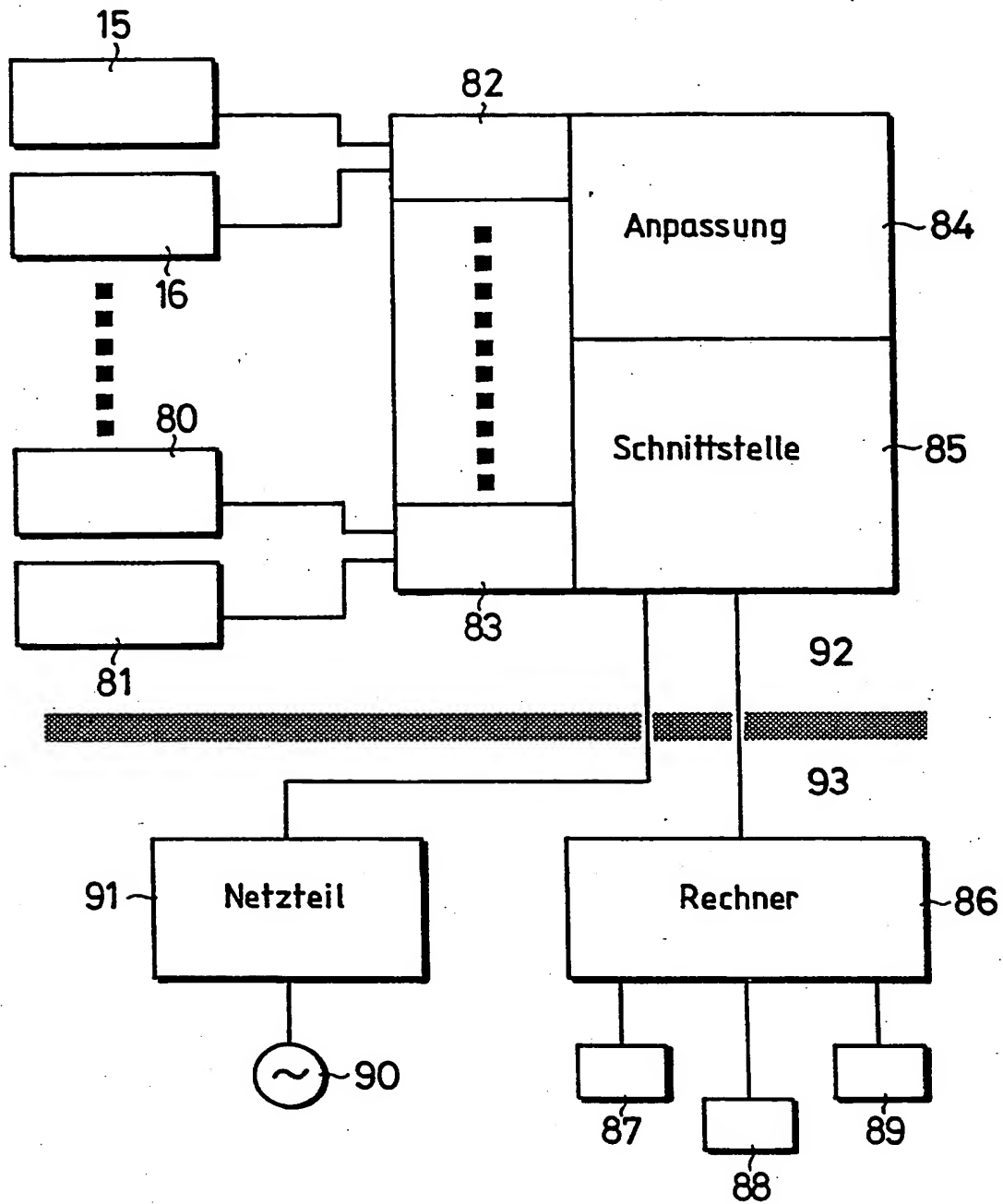
**FIG. 6a**



**FIG. 6b**

Spannung an Sensor- induktivität	Bedeutung der Spannung bei Polung gemäß Fig.5a	meßbar während Bandbewegung	meßbar vor Band- bewegung
$U_N$	Nullwert ohne zu messende Schicht	—	■
$U_M$	Meßwert bei zu messender Schicht	■	—
$U_X$	Kalibrierwert mit Schicht - Normal	—	■
$U_S$	Kalibrier-Simulation	■	■
Bedeutung der Spannung bei Polung gemäß Fig.6a			
$U_{NX}$	Nullwert ohne zu messende Schicht	■	■
$U_{MX}$	Meßwert mit zu messender Schicht	■	—
$U_{XX}$	Kalibrierwert mit Schicht - Normal	—	■
$U_{SX}$	Kalibrier-Simulation	■	■

**FIG.7**



**FIG. 8**